doi:10.13866/j.azr.2019.02.11

地基微波辐射计反演产品在青海省东部适应性研究①

康晓燕[1,2]， 张博越[1,2]， 田建兵[1,2]， 刘 娜[1,2]， 马学谦[1,2]
(1. 青海省人工影响天气办公室,青海 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室,青海 西宁 810001)

摘 要: 利用2013年青海省东部西宁站(08:00 和20:00 两个时次)探空观测资料和同址MP-3000A型微波辐射计反演数据,分析了该地区大气温度和相对湿度的垂直分布特征,讨论了微波辐射计的反演效果,并对温度偏差较大的月份进行偏差订正。结果表明:① 从高度来看,微波辐射计对低层温湿度反演明显优于高层。微波辐射计反演和探空探测年平均温度相关系数随高度上升基本呈现递减的趋势,最大在近地面,为0.988;最小在距地10 km处,为0.529,且通过了0.01水平的显著性检验。而年平均相对湿度相关系数仅3.0 km以下通过了0.01水平的显著性检验。② 从季节来看,春、夏、秋季温湿度的微波辐射计反演与探空吻合度明显好于冬季。春、夏、秋季温度相关系数均通过0.01水平的显著性检验。春、夏、秋季相对湿度的相关系数在地面到2.0 km处通过0.01水平的显著性检验,而冬季在1.5 km以下通过0.01水平的显著性检验。③ 应用订正方程对温度偏差较大的月份进行了偏差订正,效果较好。

关键词: 微波辐射计; 探空; 温度; 相对湿度; 订正; 青海

大气的温度和湿度是大气与环境的重要参数,它们的垂直分布及变化情况表征着大气热力和动力状态,对认识各种尺度的天气演变过程、做好临近天气预报和人工影响天气的决策具有重要意义[1-3]。探空是测量大气温度、湿度等要素垂直廓线的最基本方法,但目前在国内业务工作中,每天只进行两次规定时间的观测(北京时间08:00和20:00),在时间分辨率方面越来越不能满足现代气象研究与业务工作的需求[4-6]。地基微波辐射计作为一种新型的观测设备,可以获取0~10 km高度范围内的大气温度、相对湿度和液态水廓线等数据,并且具有极高时间分辨率、可无人值守、全天候和全天时连续探测等优点。因此,该设备的性能及在业务中的使用情况得到国内许多学者和业务工作者的关注。如王黎俊等[7]利用"HMR-DF"型地基微波辐射计资料,对黄河上游人工增雨作业指标及降水预测进行研究。姚俊强等[8]利用乌鲁木齐微波辐射计的观测资料和探空数据,对反演得到的温湿廓线进行了对比分析,并分析该地区夏季水汽与降水的变化关系。杨莲梅等[9]利用乌鲁木齐地基微波辐射计温湿资料,并结合L波段探空,分析微波辐射计探测温湿度性能及其在降水天气中的特征。李军霞等[10]利用微波辐射计观测资料,研究了不同天气背景下大气水汽总量、积分液态水含量和水汽密度的分布特征及其演变规律。李建强等[11]以太原地区常规探空观测资料为参考,采用统计学方法对比分析同址德国RPG-HATPRO型微波辐射计反演的温度和露点温度数据。

作为新型探测设备,地基微波辐射计在气象业务中的应用日益广泛。尤其在探空资料缺乏但对于气候变化敏感的西北地区(如青海省)[12-13],该设备的应用对该地区温、湿垂直演变特征的认识更具有积极的作用。本文利用2013年位于青海省东部西宁站的探空探测和微波辐射计反演的资料,分析了西宁大气温度、相对湿度的垂直分布特征,讨论了不同季节、时次、高度微波辐射计反演探测性能和反演效果,以期对该微波辐射计在高原地区的探测精度有一个更清晰直观的了解。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文使用的探空、微波辐射计资料由青海省西宁市二十里铺气象探空站(36.73°N,101.75°E,海

① **收稿日期:** 2018-05-04; **修订日期:** 2018-09-28
基金项目: 青海省科技计划项目(2017-ZJ-Y02);国家自然科学基金(41665008, 41705121)共同资助
作者简介: 康晓燕(1980-),女,高级工程师,主要从事人工影响天气相关技术研究. E-mail: kxy3155@163.com

拔 2 264.8 m,站号为 52866)和处于同址的 MP-3000A 地基微波辐射计提供。探空资料包括每日北京时间 08:00 和 20:00 从地面到高空的高度、温度、相对湿度等数据。微波辐射计资料从地面到距地 500 m,垂直分辨率为 50 m;从 500 m 到高空 2 km,垂直分辨率为 100 m;2 km 到 10 km,垂直分辨率为 250 m。每分钟输出一组温度、相对湿度以及液态水含量等数据,一共 58 个反演层,每天 24 h 连续观测。

考虑到资料储备完整性和连续性,时间选取 2013 年 1 月 1 日至 12 月 31 日(对由于仪器标定、信号异常等原因引起的数据缺失和异常进行了初步的数据质量控制)。将数据按月分类,再按春、夏、秋、冬 4 个季节分组。

1.2 研究方法

微波辐射计反演的产品主要包括观测点上空垂直方向 58 个固定高度层上的资料,而探空资料是每日 08:00 和 20:00 两个时次规定等压面和特定层上的观测资料。为了更好地评价微波辐射计反演的产品,考虑到两种资料的特点,本文将探空资料的温度和湿度数据进行线性插值,得到与微波辐射计数据相同高度上的结果。在时间处理上,探空释放的时间为 08:00 和 20:00,一次过程持续一般在正点前后 1 h,因此微波辐射计资料选取 07:30—08:30 和 19:30—20:30 1 h 的观测数据的平均值,分别作为 08:00 和 20:00 的值[14-16]。

针对微波辐射计资料与探空资料的吻合度、系统偏差和精度,本文主要评价项目包括:相关系数(R),平均偏差(T)和均方根误差(T_{std}),其计算公式如下:

$$R=\frac{\sum(T_ST_R)-\frac{\sum T_S\cdot\sum T_R}{N}}{\sqrt{\left[\sum T_S^2-\frac{(\sum T_S)^2}{N}\right]\left[\sum T_R^2-\frac{(\sum T_R)^2}{N}\right]}} \tag{1}$$

$$T=\left|\frac{\sum(T_R-T_S)}{N}\right| \tag{2}$$

$$T_{std}=\left|\sqrt{\frac{\sum(T_R-T_S)^2}{N}}\right| \tag{3}$$

式中:T_R 为微波辐射计观测值;T_S 为探空观测值;N 为观测样本数。

2 结果分析

2.1 温度垂直分布

从图 1 可以得知,温度随高度整体呈现递减趋势,年平均温度廓线与秋季温度廓线基本重合,温度垂直递减率按春、夏、秋、冬季依次递减。2013 年,08:00 西宁站地面平均温度为 273.7 K,10 km 处的平均温度为 220.1 K,温度垂直递减率为 5.4 $K\cdot km^{-1}$。20:00 地面平均温度为 282.2 K,10 km 处的平均温度为 219.9 K,温度垂直递减率为 6.2 $K\cdot km^{-1}$。

08:00 春、夏、秋、冬季的温度垂直递减率分别为 5.9 $K\cdot km^{-1}$、5.9 $K\cdot km^{-1}$、5.4 $K\cdot km^{-1}$和 4.3 $K\cdot km^{-1}$。20:00 春、夏、秋、冬季垂直递减率分别为 7.1 $K\cdot km^{-1}$、6.7 $K\cdot km^{-1}$、5.9 $K\cdot km^{-1}$、5.3 $K\cdot km^{-1}$。20:00 的温度垂直递减率均大于 08:00。

图 2 为 2013 年西宁站微波辐射计反演的温度垂直分布图。经微波辐射计数据反演得到,温度随高度整体呈现递减趋势,年平均温度廓线与春季温度廓线基本重合,垂直递减率按夏、春、秋、冬季的顺序依次减小。08:00 地面平均温度为 276.9 K,10 km 处的平均温度为 221.4 K,温度垂直递减率为 5.6 $K\cdot km^{-1}$。20:00 地面平均温度为 282.7 K,10 km 处的平均温度为 222.0 K,温度垂直递减率为 6.1 $K\cdot km^{-1}$。

08:00 春、夏、秋、冬的温度垂直递减率分别为 5.8 $K\cdot km^{-1}$、6.1 $K\cdot km^{-1}$、5.8 $K\cdot km^{-1}$ 和 4.4 $K\cdot km^{-1}$。20:00 春、夏、秋、冬垂直递减率分别为 6.3 $K\cdot km^{-1}$、6.4 $K\cdot km^{-1}$、6.3 $K\cdot km^{-1}$、5.1 $K\cdot km^{-1}$。

2.2 相对湿度垂直分布

由图 3a 可以看出,探空探测的 08:00 相对湿度随高度大致呈减小趋势,在距地 50 m 处出现最大值,平均相对湿度达 67%,10 km 处相对湿度最小,为 22%,每千米垂直递减率为 4.4%。春、夏、秋季相对湿度随高度的变化规律与年平均一致。冬季,3.0 km 以下相对湿度随高度呈减小趋势,3.0~6.5 km 相对湿度随高度略有增加,6.5 km 以上又呈现减少趋势。总的来看,08:00 夏季的相对湿度最大,冬季最小,春季和秋季的相对湿度在 3.0 km 以上变化较为接近。由图 3b 可以看出,探空探测的 20:00 平均相对湿度随高度的变化规律为 3.5 km 以下,相对湿度增加,由地面的 41% 增加到 47%;3.5 km 以

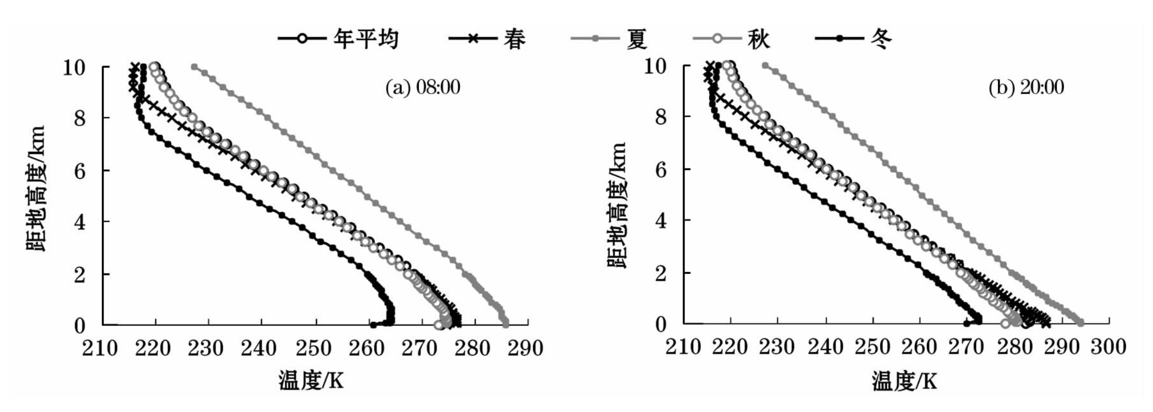


图 1 2013 年西宁 08:00 和 20:00 探空温度廓线

Fig. 1 Temperature profile of radiosonde at Xining Station at 08:00 and 20:00, 2013

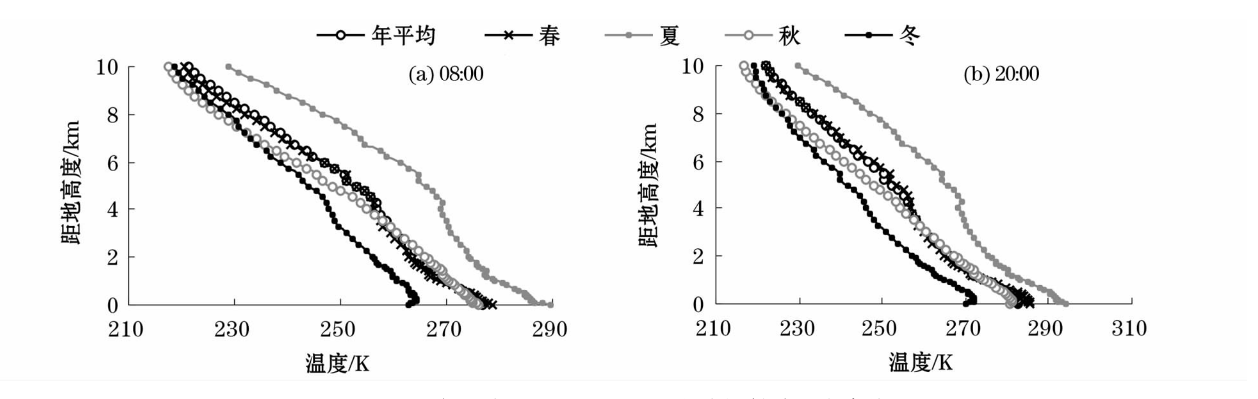


图 2 2013 年西宁 08:00 和 20:00 微波辐射计温度廓线

Fig. 2 Temperature profile of microwave radiometer at Xining Station at 08:00 and 20:00, 2013

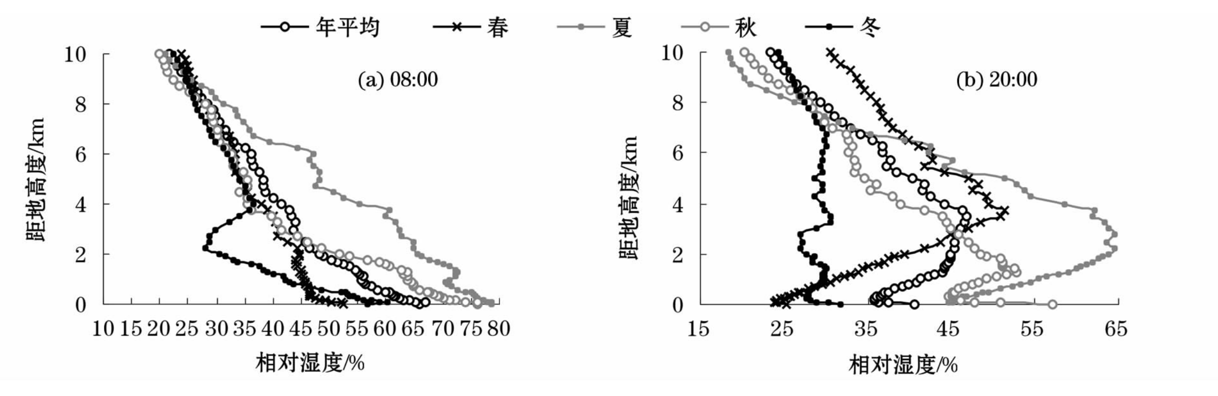


图 3 2013 年西宁 08:00 和 20:00 探空相对湿度廓线

Fig. 3 Relative humidity profile of radiosonde at Xining Station at 08:00 and 20:00, 2013

上,相对湿度随高度呈减少;10 km 处的相对湿度减小到 23%。春、夏和秋季的相对湿度随高度的变化规律与年平均基本一致。春季相对湿度在 4.0 km 以下随高度增加,4.0 km 以上减少;夏季相对湿度增加,减少的转折点出现在 3.0 km;秋季的转折点在 1.3 km 处;冬季相对湿度的变化范围很小,在 24% ~32%。总的来看 20:00 的相对湿度,6.5 km 以下夏季的最大,冬季最小;6.5 km 以上春季最大,冬季最小。

从图 4a 看出,08:00 微波辐射计反演的平均相对湿度变化规律为:1.0 km 以下,相对湿度减少,从地面的 42% 减少到 34%;1.0 ~4.5 km 相对湿度随高度递增;4.5 km 处相对湿度达到最大值 93%;4.5 ~8.0 km 相对湿度随高度呈减少趋势;8.0 km 处相对湿度为 34%;8.0 km 以上,相对湿度随高度基本呈增大趋势;10 km 处为 34% 左右。其四季相对湿度变化趋势与年平均基本一致,1.9 km 以下,夏季最大,冬季最小;1.9 ~5.0 km,春季最大,秋季

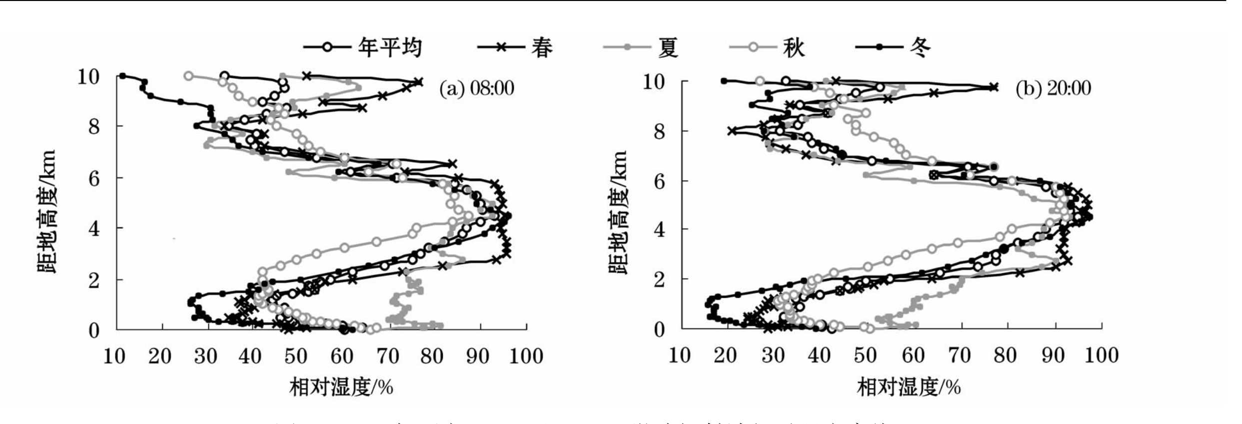


图 4　2013 年西宁 08:00 和 20:00 微波辐射计相对湿度廓线

Fig. 4　Relative humidity profile of microwave radiometer at Xining Station at 08:00 and 20:00, 2013

图 5　2013 年西宁 08:00 和 20:00 温度的相关系数、平均偏差、均方根误差

Fig. 5　Correlation coefficient, mean variation and root-mean-square error of temperature between radiosonde and microwave radiometer at Xining Station at 08:00 and 20:00 in 2013

最小;5.0～8.0 km,秋季最大,夏季最小;8.0 km 以上,春季最大,冬季最小。总的来看,相对湿度最大出现在 4.5～5.5 km 处,这可能与西宁云底高度集中在 2～5 km 有关[17]。20:00 微波辐射计反演的相对湿度垂直变化规律与 08:00 基本一致。

2.3　探空与微波辐射计的比较

2.3.1　温度的比较　图 5 为微波辐射计反演的温度与探空探测值的差异分析。08:00,微波辐射计反

演和探空探测年平均温度相关系数随高度呈现递减的趋势,最大在近地面,为0.988;最小在距地10 km处,为0.529。且均通过了显著性水平0.01的相关性检验,二者间吻合度较好。平均偏差在-4~8 K之间,均方根误差小于11 K。

从季节对比来看,冬季的相关系数、平均偏差和均方根误差较其他3个季节差,均未通过0.01水平的显著性检验,甚至出现负相关,夏、秋季相关系数均通过0.01水平的显著性检验,春季除9.5 km以上均通过了0.01水平的显著性检验。08:00的平均偏差和均方根误差均呈现秋季最小,冬季最大的变化特征。

20:00年平均温度相关系数、平均偏差和均方根误差随高度的变化趋势与08:00基本一致,但整体吻合度较08:00稍差。不同季节对比分析与08:00变化特征相同,冬季的相关系数、平均偏差和均方根误差较其他3个季节差,5.5 km以上未通过0.01水平的显著性检验。

总的来看,微波辐射计对温度反演效果:① 低层优于高层。其主要原因是,一方面,大气下层对微波辐射计的亮温贡献率大[18];另一方面,探空在探测上存在时间、地理的偏差[10]。② 冬季差于其他3季,其主要表现在08:00的低层和20:00的高层。这可能与冬季西宁地区温度过低、低层存在逆温层以及反演算法未按季节区分等有关,具体原因还需进一步分析研究。

2.3.2 相对湿度的比较 图6为微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值的差异分析。08:00微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值对比分析表明,整体来看,微波辐射计反演相对湿度的效果明显

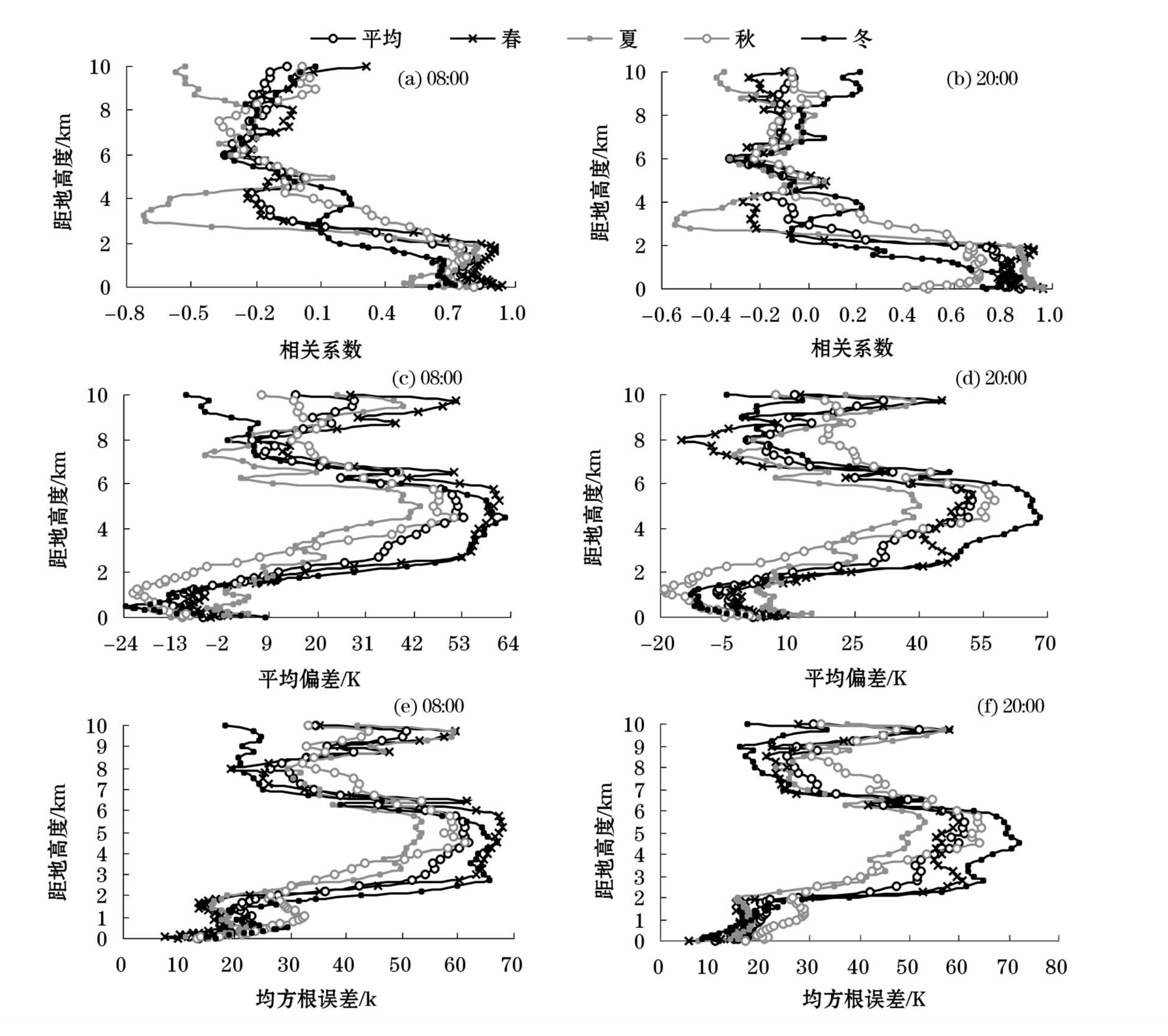


图6 2013年西宁08:00和20:00相对湿度相关系数、平均偏差、均方根误差

Fig. 6 Correlation coefficient, mean variation and root-mean-square error of relative humidity between radiosonde and microwave radiometer at Xining Station at 08:00 and 20:00 in 2013

不如温度好,相关性较差,平均偏差和均方根误差较大。相关系数随高度基本呈现递减趋势,春、夏、秋季微波辐射计反演相对湿度与探空的吻合度较好。春、夏季在距地 2.5 km 以下均通过了显著性水平 0.01 的相关性检验,其中春季在距地 2.0 km 以下相关性最好,相关系数超过 0.80。秋季在距地 3.5 km 以下相关性较好,均通过了显著性水平 0.01 的相关性检验。冬季相关性较差,仅在距地 1.7 km 以下通过了显著性水平 0.01 的相关性检验。微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值的平均偏差在 1.3 km 以下,秋季最大,夏季最小;1.3 ~ 5.5 km,冬季最大,夏季最小;5.5 ~ 8.0 km,春季最大,夏季最小;8.0 km 以上,春季最大,冬季最小。微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值的均方根误差在 2.0 km 以下,秋季最大,春季最小;2.0 ~ 3.5 km,冬季最大,秋季最小;3.5 ~ 6.5 km,四季均方根误差达到最大,超过 40%;6.5 ~ 8.0 km,秋季最大,冬季最小;8.0 km 以上,夏季最大,冬季最小。

20:00 微波辐射计反演的不同季节相对湿度与探空观测值对比分析结果较 08:00 差,四季相关系数在 1.8 km 以下均通过了显著性水平 0.01 的相关性检验,其中春季最好,冬季最差。20:00 微波辐射计反演的相对湿度与探空观测值的平均偏差与均方根误差与 08:00 基本一致。

相对温度而言,相对湿度的变化不均且比较复杂,连续性较差。水汽分布通常受对流、湍流等大气运动和蒸发、降水、凝结等因素的影响[4]。同时相关研究表明,不同高度、不同厚度云层,以及空中相对湿度较大或有降水产生时,会影响微波辐射计观测亮温,从而导致反演偏差较大。这一点在水汽丰富、降水频繁的夏季表现得尤为明显[19-20]。

2.4 温度偏差订正

由图 5 可知,平均偏差基本呈倒“S”形分布。本文试图通过拟合 08:00 和 20:00 的温度平均偏差来订正微波辐射计对温度的反演结果。图 7 为 2013 年温度平均偏差的拟合曲线。08:00 温度平均偏差的拟合方程为:

$$\Delta t = -0.122h^3 + 1.672h^2 - 4.609h + 0.748 \quad (4)$$

式中:h 为距地高度,单位 km;Δt 为不同高度的温度平均偏差,单位 K。

拟合方程的 R^2 值为 0.939,通过了 0.01 显著性水平的检验。20:00 温度平均偏差的拟合方程为:

$$\Delta t = -0.1h^3 + 1.395h^2 - 3.883h + 0.229 \quad (5)$$

拟合方程的 R^2 值为 0.940,通过了 0.01 显著性水平的检验。

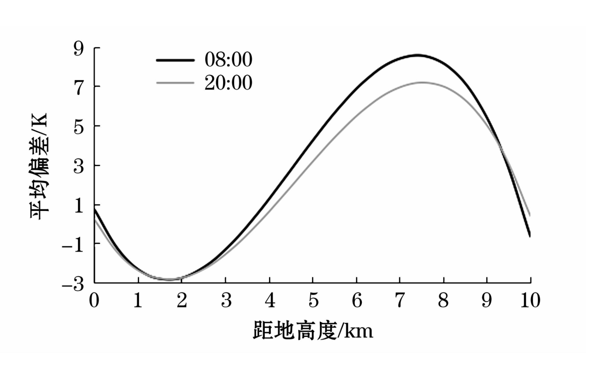


图 7　2013 年 08:00 和 20:00 温度平均偏差拟合曲线

Fig. 7　Fitted curve of temperature between radiosonde and microwave radiometer at 08:00 and 20:00, 2013

本文用拟合方程对微波辐射计反演的温度数据进行订正。通过对微波辐射计与探空间温度平均偏差分析,选取平均温度偏差较大的 08:00 的 1 月、2 月、3 月和 20:00 的 1 月、2 月、4 月对其偏差较大的高度进行订正(图 8)。08:00 订正前,1 月、2 月、3 月距地 0.80 ~ 2.75 km 最大平均偏差分别为 -7.3 K、-5.8 K、-5.7 K,距地 5.0 ~ 9.0 km 附近平均偏差最大分别为 19.6 K、15.5 K、11.6 K。订正后距地 0.80 ~ 2.75 km 的温度平均偏差绝对值小于 5 K,距地 5.0 ~ 9.0 km 附近平均偏差不超过 11 K。20:00 订正前,1 月、2 月、4 月距地 1.0 ~ 3.0 km 最大平均偏差分别为 -5.8 K、-6.5 K、-5.9 K,距地 5.5 ~ 9.0 km 附近平均偏差最大,分别为 15.8 K、12.8 K、11.2 K。订正后距地 1.0 ~ 3.0 km 的温度平均偏差绝对值小于 3.5 K,距地 5.5 ~ 9.0 km 附近平均偏差不超过 9 K。可以看出,通过偏差订正微波辐射计和探空之间的温度平均偏差有了较大幅度的减小,因此,用拟合方程(4)和(5)对微波辐射计反演的距地温度进行订正是有效的。

但由于微波辐射计资料的缺失及不连续性,应用该拟合方程进行偏差订正仅适用于 2013 年西宁站微波辐射计的温度反演结果,若使其具有广泛性,还需对多站点长序列的微波辐射计反演资料进行进一步分析。此外,由于相对湿度的反演效果在 2.0 km 以上整体较差,进行订正仍存在一定的困难,需进行进一步的研究分析。

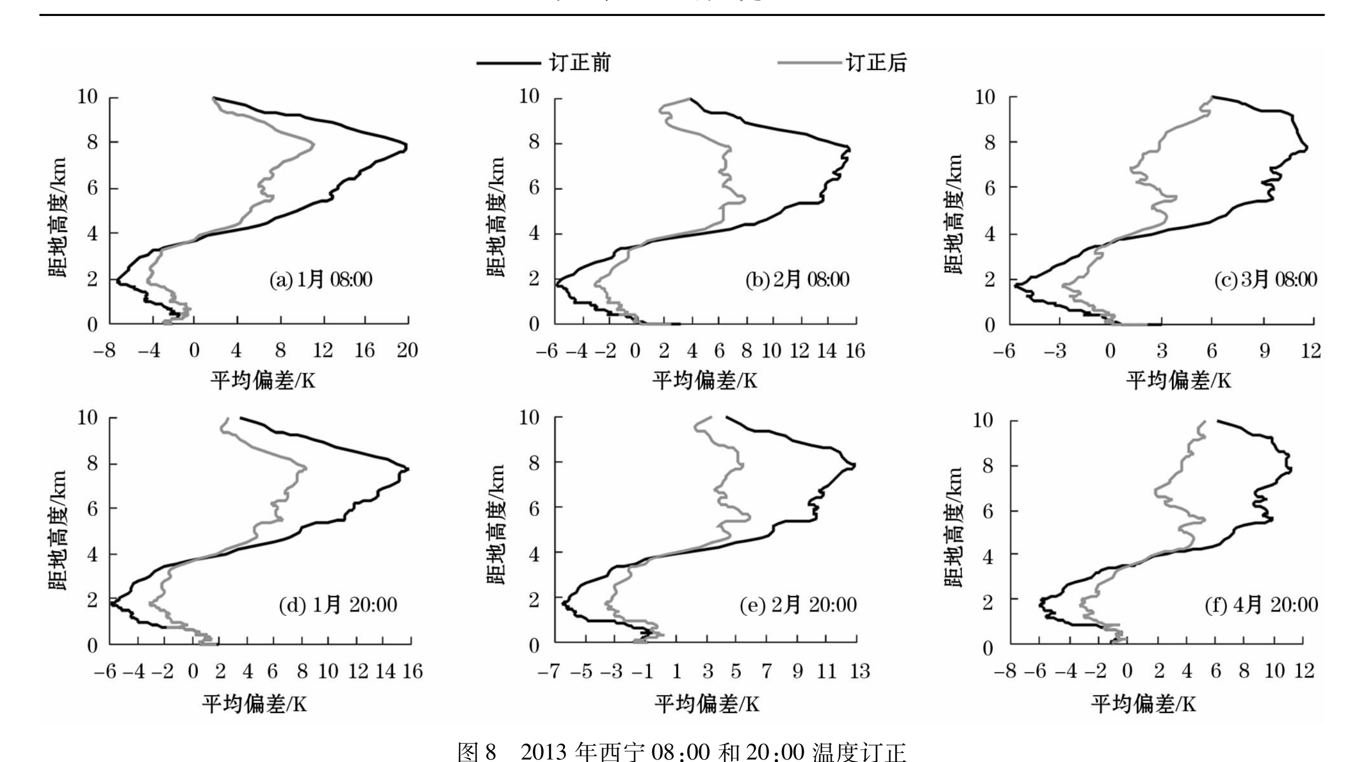


图 8　2013 年西宁 08:00 和 20:00 温度订正

Fig. 8　Correction of temperature at Xining Station at 08:00 and 20:00, 2013

3　结论与讨论

（1）2013 年西宁站的探空探测和微波辐射计反演的 20:00 温度的垂直递减率略大于 08:00。探空探测的温度垂直递减率表现为春、夏、秋、冬季依次递减，微波辐射计反演结果按夏、春、秋、冬季依次递减。探空探测的相对湿度随高度呈现递减趋势，而微波辐射计反演的相对湿度随高度的变化规律在 4.5 ~ 5.5 km 相对湿度达到最大值，这可能与西宁云层分布在 2.0 ~ 5.0 km 有关。

（2）从高度上来说，微波辐射计反演的温度与探空探测的温度相关系数随高度递减且都通过0.01 显著水平的相关性检验，平均偏差整体呈现倒“S”形分布，均方根误差随高度呈现增大趋势。这说明微波辐射计反演的温度与探空探测的温度吻合度较高，但同时也发现微波辐射计对低层的探测能力较强，高层较弱。从时次来看，20:00 一致性较差于 08:00。而从季节来看，冬季的分析结果较其他 3 季差，这可能与冬季西宁地区温度过低、逆温层的存在以及反演算法等有关。

（3）从微波辐射计反演相对湿度和探空探测结果对比分析来看，不论是在不同时次还是不同季节，微波辐射计反演相对湿度效果较温度相关性差，平均偏差和均方根误差略大。2.0 km 以下，微波辐射计反演相对湿度和探空探测结果相关性通过 0.01 显著性检验，平均偏差的绝对值在 10% 左右，均方根误差不超过 25%。2.0 km 以上，相对湿度反演效果较差，因此，在使用高层相对湿度时，需仔细对比分析。

（4）用 2013 年温度的平均偏差拟合方程对微波辐射计反演的温度偏差较大月份和高度进行初步订正，取得了较好的效果。但由于资料限制，此方法仅限于 2013 年西宁微波辐射计的温度反演结果。

（5）总的来看，微波辐射计对低层温湿度反演明显优于高层，对温度反演效果明显优于相对湿度。其原因主要有以下几个方面：第一，低层大气对微波辐射计的亮温贡献大，随着高度增加微波信号衰减严重，因此，低层的吻合度较高，偏差较小[18]。第二，大气中温度变化相对稳定，而相对湿度时空变化不均、非连续性是造成相对湿度反演效果较差的主要原因。第三，微波辐射计反演算法系统误差、探空水平位移偏差及二者间采样方法的差异[10,21]。第四，本文没有严格区分有、无降水天气下的微波辐射计反演结果。因此，对评价结果存在一定的局限性。

参考文献(References)：

〔1〕　鲍艳松，钱程，闵锦忠，等. 利用地基微波辐射计资料反演 0 ~ 10 km 大气温湿廓线试验研究〔J〕. 热带气象学报，2016，32

(2):163－171.〔Bao Yansong,Qian Cheng,Min Jinzhong,et al. 0～10 km temperature and humidity profiles retrieval from ground-based microwave radiometer〔J〕. Journal of Tropical Meteorology,2016,32(2):163－171.〕

〔2〕 刘红燕,李炬,曹晓彦,等. 遥感大气结构的地基12通道微波辐射计测量结果分析〔J〕. 遥感技术与应用,2007,22(2):222－229.〔Liu Hongyan,Li Ju,Cao Xiaoyan,et al. Characteristics of the atmosphere remote sensed by the ground-based 12-channel radiometer〔J〕. Remote Sensing Technology and Application,2007,22(2):222－229.〕

〔3〕 刘建忠,何晖,张蔷. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估〔J〕. 气象科技,2012,40(3):332－339.〔Liu Jianzhong,He Hui,Zhang Qiang. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometers at different times〔J〕. Meteorological Science and Technology,2012,40(3):332－339.〕

〔4〕 李娜,张武,陈艳,等. 基于微波辐射计的大气温湿廓线遥感探测〔J〕. 兰州大学学报(自然科学版),2015,51(1):61－71.〔Li Na,Zhang Wu,Chen Yan,et al. Remote-sensing of atmospheric temperature and relative humidity profiles based on microwave radiometer〔J〕. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition),2015,51(1):61－71.〕

〔5〕 刘红燕,王迎春,王京丽,等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析〔J〕. 大气科学,2009,33(2):388－396.〔Liu Hongyan,Wang Yingchun,Wang Jingli,et al. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2009,33(2):388－396.〕

〔6〕 张文刚,徐桂荣,廖可文,等. 地基微波辐射计探测精度的变化特征分析〔J〕. 暴雨灾害,2017,36(4):373－381.〔Zhang Wengang,Xu Guirong,Liao Kewen,et al. Analysis on variation of ground-based microwave radiometer measurement accuracy〔J〕. Torrential Rain and Disasters,2017,36(4):373－381.〕

〔7〕 王黎俊,孙安平,刘彩红,等. 地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用〔J〕. 气象,2007,33(11):28－33.〔Wang Lijun,Sun Anping,Liu Caihong,et al. Application of ground-based microwave radiometer detection to precipitation enhancement in the upper of the Yellow River〔J〕. Meteorological Monthly,2007,33(11):28－33.〕

〔8〕 姚俊强,杨青,韩雪云,等. 乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系〔J〕. 干旱区研究,2013,30(1):67－73.〔Yao Junqiang,Yang Qing,Han Xueyun,et al. Analysis on daily variation of water vapor and its relationship with rainfall in Urumqi in summer〔J〕. Arid Zone Research,2013,30(1):67－73.〕

〔9〕 杨莲梅,李霞,赵玲,等. MP－3000A型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用〔J〕. 干旱气象,2013,31(3):570－578.〔Yang Lianmei,Li Xia,Zhao Ling,et al. Detection performance of MP－3000A ground-based microwave radiometer and its preliminary application during rainfall processes in Urumqi〔J〕. Journal of Arid Meteorology,2013,31(3):570－578.〕

〔10〕 李军霞,李培仁,晋立军,等. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用〔J〕. 干旱气象,2017,35(5):767－775.〔Li Junxia,Li Peiren,Jin Lijun,et al. Remote sensing of precipitable water vapor feature and application in precipitation analysis by using ground-based microwave radiometer〔J〕. Journal of Arid Meteorology,2017,35(5):767－775.〕

〔11〕 李建强,李新生,董文晓,等. RPG-HATPRO微波辐射计反演的温度和湿度数据适用性分析〔J〕. 气象与环境学报,2017,33(6):89－95.〔Li Jianqiang,Li Xinsheng,Dong Wenxiao,et al. Applicability analysis of air temperature and humidity data retrieved from a RPG-HATPRO microwave radiometer〔J〕. Journal of Meteorology and Environment,2017,33(6):89－95.〕

〔12〕 焦洋,游庆龙,林厚博,等. 1979—2012年青藏高原地区地面气温时空分布特征〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):283－291.〔Jiao Yang,You Qinglong,Lin Houbo,et al. Spatiotemporal distribution of surface temperature over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2012〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(2):283－291.〕

〔13〕 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):68－76.〔Shang-Shasha,Lian Lishu,Ma Ting,et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):68－76.〕

〔14〕 李娜. 西北半干旱区基于微波辐射计的大气温湿廓线遥感研究〔D〕. 兰州:兰州大学,2014.〔Li Na. Remote-sensing of Atmospheric Temperature and Humidity Profiles Based on Microwave Radiometer in Semi-Arid Area of Northwest China〔D〕. Lanzhou:Lanzhou University,2014.〕

〔15〕 刘建忠,张蔷. 微波辐射计反演产品评价〔J〕. 气象科技,2010,38(3):325－331.〔Liu Jianzhong,Zhang Qiang. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometers〔J〕. Meteorological Science and Technology,2010,38(3):325－331.〕

〔16〕 卢会国,李国平,蒋娟萍,等. 阳江国际探空试验的GPS、探空、微波辐射计水汽资料对比分析〔J〕. 气象科技,2014,42(1):158－163.〔Lu Huiguo,Li Guoping,Jiang Juanping,et al. A comparative analysis of vapor data between GPS/MET radiosonde and microwave radiometer from Yangjiang International Radiosonde intercomparison〔J〕. Meteorological Science and Technology,2014,42(1):158－163.〕

〔17〕 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等. 基于CloudSat资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析〔J〕. 高原气象,2010,30(1):38－52.〔Wang Shuaihui,Han Zhigang,Yao Zhigang,et al. Analysis on cloud vertical structure over China and its neighborhood based on cloudsat data〔J〕. Plateau Meteorology,2010,30(1):38－52.〕

〔18〕 林乐科,张业荣,赵振维,等. 微波辐射计探测大气剖面的相关向量机算法〔J〕. 电波科学学报,2009,24(1):90－94.〔Lin Leke,Zhang Yerong,Zhao Zhenwei,et al. Retrieving atmosphere profiles by microwave radiometer based on RVM〔J〕. Chinese Journal of Radio Science,2009,24(1):90－94.〕

〔19〕 赵玲,马玉芬,张广兴,等. MP－3000A微波辐射计的探测原理

及误差分析〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2009,3(5):54－57.〔Zhao Ling, Ma Yufen, Zhang Guangxing, et al. The principle and error analysis of microwave radiometer MP－3000A〔J〕. Desert and Oasis Meteorology, 2009,3(5):54－57.〕
〔20〕车云飞,马舒庆,杨玲,等. 云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响〔J〕. 应用气象学报,2015,26(2):193－202.〔Che Yunfei, Ma Shuqing, Yang Ling, et al. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer〔J〕. Journal of Applied Meteorology Science, 2015,26(2):193－202.〕
〔21〕陈哲. 中国探空气球水平漂移总体特征分析〔J〕. 气象,2010,36(2):22－27.〔Chen Zhe. Characteristics of the overall sounding data drift in China〔J〕. Meteorological Monthly, 2010, 36(2):22－27.〕

Applicability of Products Rretrieved from Microwave Radiometer in East Qinghai Province

KANG Xiao-yan[1,2], ZHANG Bo-yue[1,2], TIAN Jian-bing[1,2], LIU Na[1,2], MA Xue-qian[1,2]
(1. *Qinghai Weather Modification Office*, *Xining* 810001, *Qinghai*, *China*;
2. *Qinghai Province Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction*, *Xining* 810001, *Qinghai*, *China*)

Abstract: The vertical distribution characteristics of temperature and relative humidity (RH) in Xining region were analyzed using the data of radiosonde (at 08:00 and 20:00, BT) and the corresponding MP－3000A microwave radiometer over Xining in east Qinghai Province in 2013. The inversion effect of the microwave radiometer was discussed, and the correction of temperature in the months with high deviation was made. The results are as follows: ① The inversion of low-layer temperature and RH from the microwave radiometer was obviously superior to that of high layer. The correlation coefficient of annual mean temperature was in a decrease trend with the increase of height. The maximum value (0.988) occurred at the surface layer, and the minimum one (0.529) at 10 km height from the ground. The correlation coefficient of annual mean RH below 3 km height passed a significance test at 0.01 level; ② In spring, summer and autumn, the matching of temperature and RH between microwave radiometer and radiosonde was significantly better than that in winter. The correlation coefficients of temperature passed a significant test at 0.01 level in the three seasons. The correlation coefficients of RH in the three seasons were passed the significance test from the ground surface to 2 km height, but the correlation coefficient of RH in winter was passed below 1.5 km; ③ The correction equation was used to correct the bias in the months with large temperature deviation, and the effect was good.

Key words: microwave radiometer; radiosonde; temperature; relative humidity; correction; Qinghai Province